

УДК 532.72:533.6.011

В. Л. Малышев

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ СИСТЕМЫ ЖЕСТКИХ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ КАНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

UDC 532.72:533.6.011

V. L. Malyshev

NON-ISOTHERMAL VAPORIZATION OF LIQUIDS FROM THE SYSTEM OF RIGID INTERCONNECTED CHANNELS OF ARBITRARY FORM

Аннотация

Теоретически исследовано влияние неравномерного прогрева на интенсивность массопереноса в осушаемых капиллярно-пористых объектах. В качестве модельной среды рассматриваются возможные сочетания бинарных жестких каналов произвольной формы.

Ключевые слова:

неизотермическое испарение, сообщающиеся каналы.

Abstract

The influence of non-uniform heating on the intensity of mass transfer in drained capillary-porous objects is investigated theoretically. As a model media, possible combinations of binary rigid channels of arbitrary form are examined.

Keywords:

non-isothermal vaporization, interconnected channels.

Введение

Объектом исследования являются капиллярно-пористые системы, подвергающиеся интенсивному тепловому воздействию. Моделирование процессов массопереноса при фазовых переходах в многофазных средах актуально для строительной, пищевой, деревообрабатывающей, химической и ряда других отраслей промышленности. Результаты получены в рамках выполнения Государственных научных программ «Тепловые процессы», «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика».

Цель работы – установить физические закономерности, дать их математическое описание, объединив в постановке задачи различные факторы, влияющие

на характер испарения жидкостей в ограниченных объемах капилляров. В представленных моделях учтены такие аспекты, как переменные геометрические характеристики пористого пространства, взаимосвязь отдельных каналов, различные режимы парообразования, а также неравномерность прогрева осушаемой среды.

Постановка задачи

При осушении капиллярно-пористых тел массоперенос в них происходит в комплексе сообщающихся капилляров, радиусы которых могут оставаться как постоянными, так и изменяться вдоль осевой линии, образуя многочисленные сочетания диффузорных и конфузорных каналов различного типа.



Для их характеристики вводится безразмерный параметр a , который определяет отношения предельных радиусов R_0/r_0 , где r_0 – начальный радиус ($x = 0$); R_0 – конечный радиус ($x = L$). Очевидно, что для цилиндрических каналов он равен единице. Пористые материалы, обладающие капиллярами, имеющими на поверхности отверстия большего радиуса, чем в глубине тела, называются диффузорными ($a < 1$). Каналами конфузорного типа обладают капиллярно-пористые структуры с отверстиями на поверхности меньшего поперечного размера, нежели в объеме ($a > 1$).

Изменения радиуса капилляра задаются безразмерным параметром $b = \frac{dr}{dx}$, называемым конусностью [1]. Отличия между разновидностями капилляров определяются неодинаковой по оси x кривизной стенок $k = \frac{db}{dx}$.

Изменение площади поперечного сечения вдоль оси x может происходить как равномерно ($k = 0$), так и неравномерно – сначала медленно, затем быстрее ($k > 0$) или наоборот ($k < 0$) (табл. 1 и рис. 1).

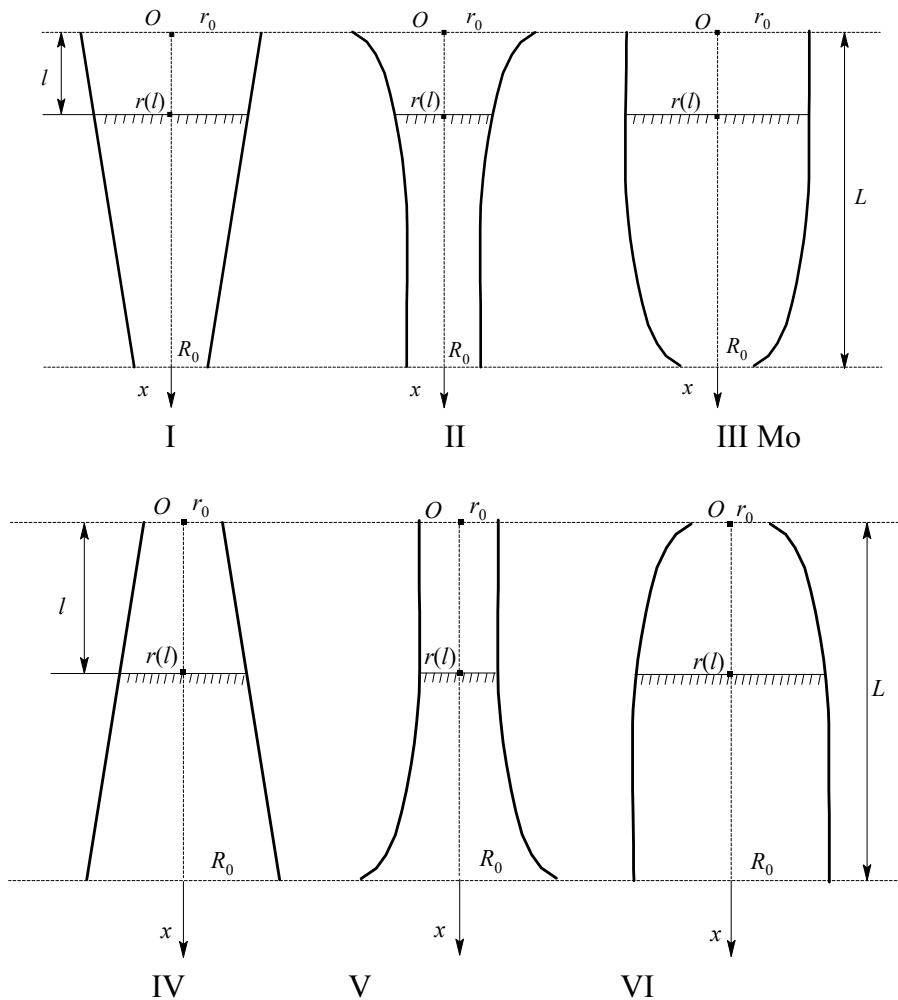


Рис. 1. Основные типы каналов переменного сечения



Табл. 1. Классификация конических каналов

Тип	Диффузорный			Конфузорный		
	I	II	III	IV	V	VI
$\frac{R_0}{r_0}$	$a < 1$	$a < 1$	$a < 1$	$a > 1$	$a > 1$	$a > 1$
$\frac{dr}{dx}$	$b < 0$	$b < 0$	$b < 0$	$b > 0$	$b > 0$	$b > 0$
$\frac{db}{dx}$	$k = 0$	$k < 0$	$k > 0$	$k = 0$	$k > 0$	$k < 0$

Законы увеличения ($a > 1$) или уменьшения ($a < 1$) радиусов поверхности испарения конических капилляров могут быть заданы линейной, показательной или параболической функциями соответственно

$$r(z) = r_0[1 + (a - 1)z]; \quad (1)$$

$$r(z) = r_0 a^z; \quad (2)$$

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + (a^2 - 1)z}. \quad (3)$$

С целью обобщения выводов теории на капилляры произвольной длины L за-

висимости радиусов каналов от положения l межфазной поверхности выражаются через относительную координату мениска $z = l/L$ и относительный радиус устья $\gamma_0 = r_0/L$, а сам переменный радиус поперечного сечения – через $\gamma = r/L$.

Закономерности осушения одиночных каналов

Время смещения мениска в процессе испарения из капилляров каждого типа определяется, как показано в [2, 3], следующими выражениями:

– тип I:

$$\frac{\ln|1 + (a - 1)z| \cdot [1 + (a - 1)z] + 1}{(a - 1)^2 [1 + (a - 1)z]} \Bigg|_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t; \quad (4)$$

– тип II:

$$\frac{(-1)(2z \ln a + 1)}{4a^{2z} \ln^2 a} \Bigg|_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t; \quad (5)$$

– тип III:

$$\frac{\left[(a^2 - 1)z \ln|1 + (a^2 - 1)z| \right]}{(a^2 - 1)^2} \Bigg|_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t; \quad (6)$$

– тип IV:

$$\left[\frac{z^2}{2} + 2(a - 1)\frac{z^3}{3} + (a - 1)^2 \frac{z^4}{4} \right] \Bigg|_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t; \quad (7)$$

– тип V:

$$\frac{a^{2z}}{4 \ln a} \left(2z - \frac{1}{\ln a} \right) \Bigg|_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t; \quad (8)$$



– тип VI:

$$\left[\frac{z^2}{2} + (a^2 - 1) \frac{z^3}{3} \right]_{z_1}^{z_2} = \gamma_0^2 BF \Delta t, \quad (9)$$

где B – термический коэффициент испарения, $B = \frac{(c_s^2 - 1)}{\eta T}$; F – молекулярный

коэффициент испарения, $F = \frac{P_0^2 \mu}{16R\rho}$;

μ – молярная плотность потока пара; P_s – давление насыщенного пара при температуре T ; P_0 – давление окружающей газовой среды; R – универсальная газовая постоянная; ρ – плотность жидкости; c_s – относительная концентрация насыщенного пара, $c_s = P_s/P_0$; η – коэффициент динамической вязкости парогазовой смеси, определяемый путем усреднения вязкостей компонентов η_1 и η_2 по парциальным давлениям P_s и P_0 :

$$\eta = \frac{\eta_1 P_s + \eta_2 P_0}{P_s + P_0}.$$

В процессах, протекающих при температурах $T < T_{кит}$, реализуется диффузионный режим массопереноса, подчиняющийся классическому уравнению Стефана [4], в котором отсутствует зависимость потока пара от радиуса капилляра. Тогда независимо от формы канала (цилиндрического, диффузорного или конфузорного) время испарения будет

определяться соотношением

$$\frac{L^2}{GA} \cdot \frac{(z_2)^2 - (z_1)^2}{2} = \Delta t, \quad (10)$$

где G – диффузионный коэффициент испарения, $G = \frac{P_0 \mu}{R\rho}$; $A(T)$ – термический

коэффициент испарения, $A(T) = \frac{D}{T} \ln \frac{1-\varphi}{1-c_s}$; D – коэффициент

взаимной диффузии пара и газа; φ – относительная влажность в среде, $\varphi = P_{01}/P_0$; P_{01} – давление паров испаряющейся жидкости в окружающем пространстве.

Моделирование высокотемпературного парообразования в сообщающихся каналах

Исследуем специфику интенсивного массопереноса при фазовых переходах в различных бинарных сочетаниях перечисленных типов капилляров (табл. 2, см. рис. 1). Через 0 обозначены цилиндрические каналы.

Табл. 2. Возможные сочетания капилляров в сообщающихся бинарных системах

	0	I	II	III	IV	V	VI
0	–	1	2	3	4	5	6
I	1	7	8	9	10	11	12
II	2	8	13	14	15	16	17
III	3	9	14	18	19	20	21
IV	4	10	15	19	22	23	24
V	5	11	16	20	23	25	26
VI	6	12	17	21	24	26	27



Подробно исследованные в [5] общающиеся двойные цилиндрические системы (0–0) в 27 вошедших в табл. 2 комбинаций не включены.

Как известно, при нормальных внешних условиях под действием капиллярных сил в сообщающихся сосудах уровень жидкости устанавливается тем выше, чем меньше их диаметр. В процессе преобразования сначала испаряется жидкость из более широкого, т. к. капиллярные силы в узком не дают уровням в них установиться на одной высоте. Нагревание эти силы уменьшает [6], поэтому из заполненных при нормальных условиях сообщающихся капилляров ($d_1 \neq d_2$) по достижении температур по-

рядка $T > T_{кин}$ происходит перетекание из узкого канала в широкий, замедляя движение столба жидкости в нем, но ускоряя его в смежном. Таким образом, при высоких температурах испарение из сообщающихся каналов должно протекать синхронно, причем время его будет зависеть от соотношения между радиусами.

Испарение из капилляра большего радиуса r_1 происходит интенсивнее, чем из узкого капилляра радиуса r_2 , поэтому за одинаковое время Δt поверхность фазового превращения сместится на различные расстояния l' и l'' соответственно (рис. 2, см. табл. 2).

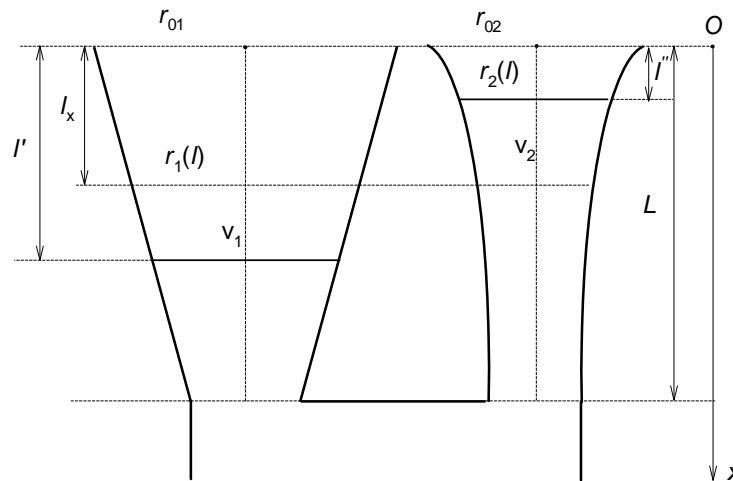


Рис. 2. Схема испарения из системы смежных диффузорных каналов смешанного типа (I–II)

Уровни однородной жидкости в сообщающихся каналах устанавливаются на одной высоте l_x . При этом новое положение межфазной границы определяется из условия несжимаемости жидкости, из которого следует равенство объема V_2 , перешедшего из малого капилляра, и V_1 , поступившего в широкий капилляр,

$$\pi r_1^2 (l' - l_x) = \pi r_2^2 (l_x - l'');$$

$$l_x = \frac{r_1^2 l' + r_2^2 l''}{r_1^2 + r_2^2}. \quad (11)$$

Или в относительных единицах

$$z_x = \frac{r_1^2 z' + r_2^2 z''}{r_1^2 + r_2^2} \quad (12)$$

($a_1 < 1, k_1 = 0$ и $a_2 < 1, k_2 < 0$) (модель 8).

За одинаковый промежуток времени Δt мениск в более широком из сообщающихся капилляров смещается дальше в процессе испарения жидкостей, чем в относительно узком (z'_2 и z''_2). Тем не менее, вследствие сообщаемости каналов, в них установится единый уровень z_x , определяемый выражения-

ми (11) и (12). Установившийся при предыдущем шаге общий уровень в обоих каналах z_x принимается за $z'_1 = z''_1$.

Применимость квазицилиндрического подхода к коническим каналам

Полученные в [5] формулы (11) и (12) применимы для капилляров переменного сечения с оговоркой, что интервал времени Δt должен быть достаточно

$$\frac{\Delta r}{r(z'_1)} = \frac{r(z'_1) - r(z'_2)}{r(z'_1)} = \delta \Rightarrow \Delta r = \delta r(z'_1); \tag{13}$$

$$r(z'_2) = r(z'_1) - \delta r(z'_1) = (1 - \delta)r(z'_1). \tag{14}$$

Для расширяющихся вглубь материала капилляров ($a > 1$) получим соответственно

$$r(z'_2) = (1 + \delta)r(z'_1). \tag{15}$$

Изменения радиусов возможных типов конических каналов (1)–(3) после подстановки в них (14) и (15) приводятся к виду (16), (18), (20):

$$r_0[1 + (a - 1)z'_2] = (1 + \delta)r_0[1 + (a - 1)z'_1], \tag{16}$$

откуда

$$z'_2 = \frac{(1 \pm \delta)[1 + (a - 1)z'_1] - 1}{a - 1}; \tag{17}$$

$$r_0 a^{z'_2} = (1 \pm \delta)r_0 a^{z'_1}, \tag{18}$$

соответствующему

$$z'_2 = z'_1 \log(1 \pm \delta); \tag{19}$$

$$r_0 \sqrt{1 + (a^2 - 1)z'_2} = (1 \pm \delta)r_0 \sqrt{1 + (a^2 - 1)z'_1}, \tag{20}$$

из которого следует

$$z'_2 = \frac{(1 \pm \delta)^2 [1 + (a - 1)z'_1] - 1}{(a^2 - 1)}. \tag{21}$$

мал, чтобы полагать изменения радиуса пренебрежимыми.

Выбор следующего шага для широкого капилляра z'_2 определяется его конусностью. При выбираемом смещении мениска изменением радиуса пренебрегаем с любой заданной погрешностью δ . Для сужающихся от поверхности каналов ($a < 1$)

При этом знак «плюс» соответствует $a > 1$, знак «минус» – $a < 1$.

За одинаковый интервал времени Δt , определяемый для любого из капилляров I–VI, 0 по формулам (4)–(10), соответственно, межфазные поверхности в разных каналах при независимом испарении прошли бы неодинаковые отрезки z'_2 и z''_2 . Определить один из них (z'_2) можно, задав исходное значение координаты $z'_1 = z''_1$, с требуемой точностью с помощью (17) – для I, IV, (19) – для II, V и (21) – для III, VI. Далее следует приравнять Δt в виде (4)–(10) для любой пары каналов из 27 возможных вариантов. Полученное уравнение позволит по известным параметрам z'_1, z''_1, z'_2 найти неизвестное значение z''_2 .

На таких значениях координат z'_2 и z''_2 установились бы мениски в каналах за одинаковое время при независимом испарении. Таким образом могут быть получены уравнения, связывающие z'_2 и z''_2 во всех бинарных сочетаниях капилляров различных типов (см. табл. 2).

При любом выбранном z'_2 в зависимости от формы канала по (17), (19) или (21) определяются z''_2 . Далее, со-



гласно (12), может быть найдено новое положение межфазной поверхности в сообщающихся капиллярах z_x .

Расчет положения межфазной поверхности z_2'' во втором капилляре по заданному уровню жидкости z_2' в первом

Для синхронизации процесса испарения в бинарных сочетаниях любых одно- и разнотипных капилляров (см. табл. 2) следует приравнять соответствующую пару выражений из комплекта формул (4)–(9). В качестве примера рассмотрим модель 8 (см. табл. 2), сочетающую диффузорные каналы смешанного типа (см. рис. 2), для которой время осушения капилляров I и II типов в вязком режиме определяется, в частности, выражениями (4)–(5), а в диффузионном – (10).

Вязкий – вязкий

$$\frac{1}{\gamma_{01}^2 B_1} \left[\frac{\ln|1+(a_1-1)z'| \cdot [1+(a_1-1)z'] + 1}{(a_1-1)^2 [1+(a_1-1)z']} \right]_{z_1'}^{z_2'} = \frac{1}{\gamma_{02}^2 B_2} \left[\frac{(-1)2z'' \ln a_2 + 1}{4a_2^{2z''} - 1)^2 [1+(a_1-1)z']} \right]_{z_1''}^{z_2''} \quad (22)$$

Вязкий – диффузионный

$$\frac{16}{\gamma_{01}^2 B_1 P_0} \left[\frac{\ln|1+(a_1-1)z'| \cdot [1+(a_1-1)z'] + 1}{(a_1-1)^2 [1+(a_1-1)z']} \right]_{z_1'}^{z_2'} = \frac{L^2}{A_2} \cdot \frac{(z'')^2}{2} \Big|_{z_1''}^{z_2''} \quad (23)$$

Диффузионный – вязкий

$$\frac{L^2}{A_1} \cdot \frac{(z')^2}{2} \Big|_{z_1'}^{z_2'} = \frac{16}{\gamma_{02}^2 B_2 P_0} \left[\frac{(-1)(2z'' \ln a_2 + 1)}{4a_2^{2z''} \ln^2 a_2} \right]_{z_1''}^{z_2''} \quad (24)$$

Диффузионный – диффузионный

$$\frac{L^2}{A_1} \cdot \frac{(z')^2}{2} \Big|_{z_1'}^{z_2'} = \frac{L^2}{A_2} \cdot \frac{(z'')^2}{2} \Big|_{z_1''}^{z_2''} \quad (25)$$

Алгоритм расчета времени осушения бинарных сочетаний сообщающихся каналов в неизотермических условиях

Для каждого из сочетаний цилиндрических и конических капилляров исследовано по четыре варианта возможных режимов испарения жидкостей в смежных капиллярах при различных температурах вблизи T кипения: вязкий ($T > T_{кип}$) – вязкий ($T > T_{кип}$), вязкий ($T > T_{кип}$) – диффузионный ($T < T_{кип}$), диффузионный ($T < T_{кип}$) – вязкий ($T > T_{кип}$), диффузионный ($T < T_{кип}$) – диффузионный ($T < T_{кип}$). Получены уравнения, позволяющие находить положение межфазной поверхности на каждом очередном шаге для любого сочетания сообщающихся капилляров. Так, если задан шаг в одном из них (z_2'), то полученные алгебраические уравнения позволяют определить за то же время положение испаряющей поверхности (z_2''). Затем с помощью формулы (12) находят общий уровень жидкости z_x в исследуемой бинарной системе капилляров, который становится исходным для очередного последующего шага. Длительность каждого шага в зависимости от формы выбранного канала рассчитывается по соответствующей формуле из (4)–(10). Суммированием всех интервалов Δt_i может быть установлено полное время осушения системы ($0 \leq z \leq 1$).

Заключение

Впервые влияние сообщаемости пор на интенсивность высокотемпературного парообразования в неизотерми-



ческих условиях было рассмотрено в [7] на модели цилиндрических каналов. В результате оказалось возможным внести поправки в расчётное время удаления влаги, основанное на оценках по одиночной модели. Позднее в [8] теория была обобщена на капилляры произвольной формы, что позволило по известной структуре пористого пространства в изотермических условиях смоделировать испарение из бинарной системы взаимосвязанных капилляров любого типа. В настоящем исследовании разработан вычислительный алгоритм расчёта времени осушения бинарных моделей в неизотермических условиях, обусловленных неравномерным прогревом тела. Полученный результат является наиболее общим из имеющихся в литературе.

лизовать испарение из бинарной системы взаимосвязанных капилляров любого типа. В настоящем исследовании разработан вычислительный алгоритм расчёта времени осушения бинарных моделей в неизотермических условиях, обусловленных неравномерным прогревом тела. Полученный результат является наиболее общим из имеющихся в литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испарение жидкостей из капилляров переменного сечения / Н. И. Гамаюнов [и др.] // ИФЖ. – 1984. – Т. 47, № 4. – С. 647–651.
2. **Малышев, В. Л.** Влияние структуры гетерогенных сред на испарение жидкостей при интенсивном тепловом воздействии / В. Л. Малышев // ТВТ. – 2009. – Т. 47, № 4. – С. 584–588.
3. **Малышев, В. Л.** Интенсивность испарения перегретых жидкостей из конических каналов / В. Л. Малышев // Весці НАНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 1. – С. 71–76.
4. **Лыков, А. В.** Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1972. – 560 с.
5. **Малышев, В. Л.** Вязкий режим испарения жидкостей в системе испаряющихся капилляров / В. Л. Малышев // Весн. Магілёў. дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. – 2009. – № 4 (34). – С. 178–184.
6. **Ершова, Г. Ф.** Температурная зависимость толщины полимолекулярных адсорбционных плёнок воды на поверхности кварца / Г. Ф. Ершова, З. М. Зорин, Н. В. Чураев // Колл. журн. – 1975. – Т. 37, № 1. – С. 208–210.
7. **Малышев, В. Л.** Испарение из смежных цилиндрических каналов при наличии поперечного градиента температуры / В. Л. Малышев, А. В. Шлапаков // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. – 2015. – № 2 (19). – С. 88–94.
8. **Малышев, В. Л.** Влияние сообщаемости пор на интенсивность массообменных процессов в бинарных капиллярных системах произвольной формы / В. Л. Малышев, Т. В. Светлова // Весн. Магілёў. дзярж. ун-та імя А. А. Куляшова. Сер. В. – 2013. – № 2 (42). – С. 84–94.

Статья сдана в редакцию 20 марта 2018 года

Владимир Львович Малышев, канд. физ.-мат. наук, доц., Могилевский государственный университет продовольствия. E-mail: malyshev@tut.by.

Vladimir Lvovich Malyshev, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Mogilev State University of Food Technologies. E-mail: malyshev@tut.by.

